

# Koncepcja hydrostatycznego układu napędowego dla bezzałogowej platformy lądowej o skręcie burtowym

Adam Bartnicki, Tomasz Muszyński

## 1. Wprowadzenie

Poruszanie się pojazdów w trudnych warunkach terenowych wiąże się z koniecznością dysponowania przez nie odpowiednio wysoką mobilnością terenową. Jest to związane m.in. z takimi parametrami, jak: kąt natarcia, kąt zejścia, prześwit, zwrotność, nacisk jednostkowy na podłoże czy kąt rampowy. Szczególnie wysokie wymagania stawiają tu odbiorcy wojskowi [4]. Ze względu na pożądaną dynamikę prowadzenia działań ważna jest dla nich również prędkość jazdy, która nie powinna być niższa niż  $v_j > 30\text{--}40$  km/h. Dotychczasowe doświadczenia wykazują, że najlepiej sprawdzają się w takich rozwiązaniach wieloosiowe kołowe układy bieżne. Przykładem tego typu rozwiązań mogą być brytyjski Supacat MK111 czy polski Lewiatan (rys. 1).

Dążenie do ochrony życia żołnierzy sprawia, że szeroko rozwijane są obecnie tego typu pojazdy w wersjach bezzałogowych (BPL – bezzałogowe platformy lądowe), najczęściej zdalnie sterowanych (rys. 1 b). Brak operatora na pojeździe znacznie utrudnia realizowanie procesu jazdy. Aby go ułatwić i poprawić



Rys. 1. Trójosiowe pojazdy o wysokiej mobilności terenowej: a) Supacat MK111 (Wielka Brytania); b) Lewiatan ZS (Polska)

**Streszczenie:** W referacie przedstawiono przykłady struktur hydrostatycznych układów napędowych jazdy pojazdów i maszyn o skręcie burtowym. Zaprezentowano również problematykę ich zastosowania w wieloosiowych podwoziach kołowych, od których wymaga się wysokiej mobilności terenowej. W zasadniczej części referatu skupiono się na projekcie takiego układu dla 3-tonowej bezzałogowej platformy lądowej.

**Słowa kluczowe:** hydrostatyczne układy napędowe jazdy, wieloosiowe podwozia kołowe, mobilność terenowa.

## CONCEPTION OF HYDROSTATIC DRIVING FOR SKID STEER UNMANNED GRUND VEHICLE ABSTRACT

**Abstract:** The paper presents examples of structures hydrostatic drive systems for skid steer vehicles and machinery. Also presented problems of their use in high mobility multi-wheeled chassis. The essential part of the paper focuses the design of hydrostatic drive for the 3000 kg unmanned ground platform.

manewrowość, co jest istotne w szczególnie trudnym terenie, stosuje się burtowe systemy skrętu (rys. 2).

Precyzja sterowania nabiera istotnego znaczenia w przypadku realizacji zadań związanych z wykrywaniem, podejmowaniem i neutralizacją improwizowanych ładunków wybuchowych. Często o powodzeniu tego typu misji decyduje poziom mobilności platformy, który wymiennie przekłada się na tempo realizacji zadania, a tym samym i na czas ekspozycji żołnierzy na ewentualne zagrożenia.

Większość producentów, którzy oferują obecnie BPL, wykorzystuje napęd elektryczny. Jego zasadniczą zaletą jest podatność na zastosowanie zdalnego sterowania, natomiast wadą jest dość ograniczony czas operowania.

W Katedrze Budowy Maszyn Wojskowej Akademii Technicznej prowadzone są obecnie prace nad różnego typu BPL, które wyróżniają się tym, że posiadają hydrostatyczny układ napędowy. Jednym z nich jest 3-tonowy inżynierski robot wsparcia, którego maksymalna prędkość jazdy będzie wynosić około  $v_j \approx 35\text{--}40$  km/h.

## 2. Hydrostatyczne układy napędowe w maszynach i pojazdach

Postępujący rozwój elementów hydraulicznych, ich niezawodność i wprowadzanie nowoczesnych układów sterowania (CAN-bus) sprawia, że konstrukcje hydrostatyczne znajdują co-

raz szersze zastosowanie. Podstawowymi aspektami przemawiającymi za ich wykorzystywaniem do napędzania układów bieżnych są [1]:

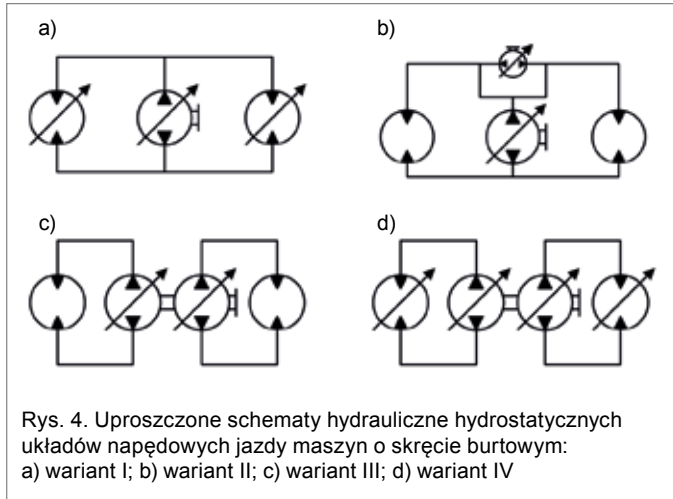
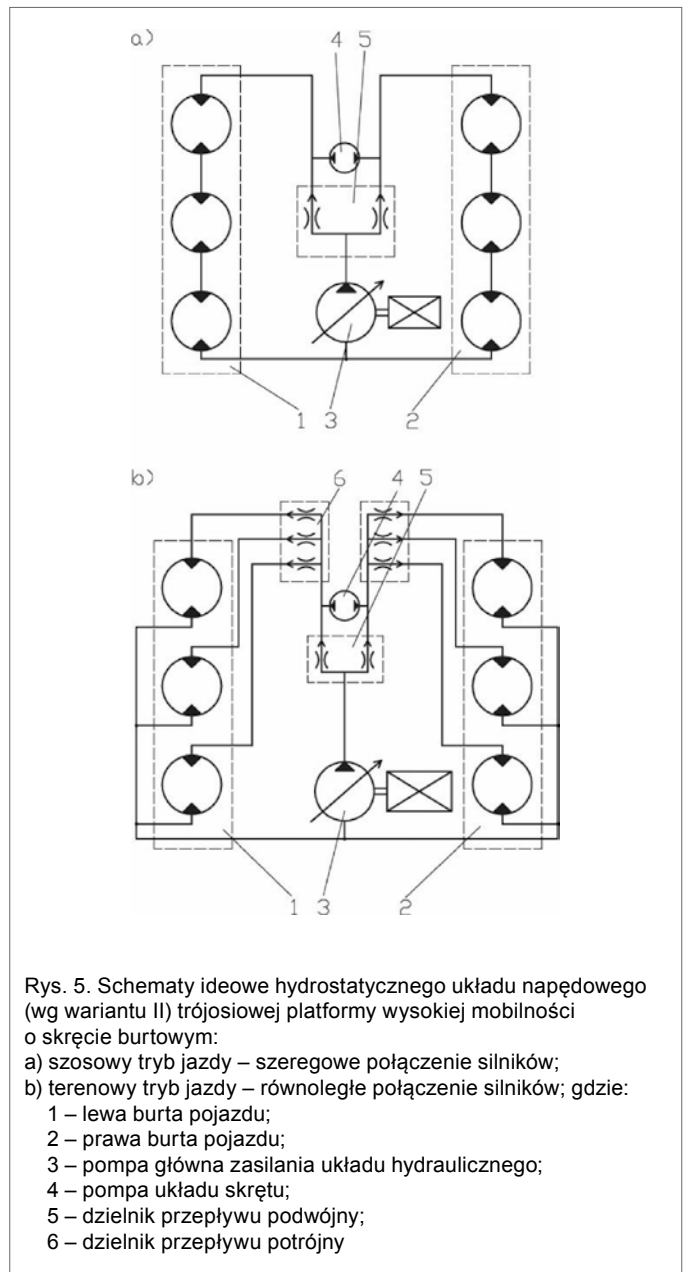
- łatwość kształtowania układu przenoszenia napędu od silnika spalinowego do kół bieżnych;
- możliwość uzyskania bezstopniowej zmiany przełożenia;
- wykorzystywanie korzystnego obszaru pracy silnika spalinowego;
- eliminacja rozłączalnych sprzęgieł, skrzyń biegów, przekładni rozdzielczych za silnikiem napędowym;
- eliminacja przekładni rozdzielczych za skrzyniami biegów; do napędu urządzeń dodatkowych wykorzystywana jest energia hydrauliczna cieczy;
- możliwość realizowania napędu odwróconego;
- zabezpieczenie silnika napędowego przed przeciążeniem;
- możliwość realizowania jazdy z automatyczną zmianą przełożenia.

Na rynku maszyn i pojazdów można spotkać szereg konstrukcji wykorzystujących hydrostatyczne układy napędowe. W niektórych z nich stosuje się je do wprawiania w ruch zarówno elementów układu bieżnego, jak i roboczego [1]. Takie rozwiązania dominują szczególnie w lekkich maszynach inżynierskich, takich jak np. miniładowarki (rys. 3). W ich przypadku, z uwagi na wymaganą dużą manewrowość, stosuje się najczęściej burtowe układy skrętu.

Wymienione zalety napędu hydrostatycznego, a szczególnie możliwość precyzyjnego sterowania prędkością jazdy i rozwijania – w znacznym jej zakresie – dużej siły napędowej, sprawi-



Rys. 2. Zdalnie sterowane roboty o skręcie burtowym: a) Robot Defender D2 (Wielka Brytania); b) pojazd Morri (Finlandia)



ły, że zaczęto je stosować również w BPL wysokiej mobilności. Przykładem takiej konstrukcji jest pojazd Lewiatan (rys. 1 b). W odróżnieniu od zaprezentowanych wcześniej miniatdowarek, nie posiada on jednak burtowego, lecz zwrotnicowy układ skrzętu.

### 3. Koncepcja hydrostatycznego układu napędowego trójosiowej platformy wysokiej mobilności o skręcie burtowym

Burtowy system skrzętu wymusza konieczność różnicowania prędkości kół (gąsienic) po prawej i lewej stronie pojazdu. Efekt ten można uzyskać przy różnych strukturach hydrostatycznych układów napędowych (rys. 4) [2, 6]:

- wariant I – układ z jedną pompą hydrauliczną o zmiennej wydajności i dwoma silnikami hydraulicznymi o zmiennej chłonności;
  - wariant II – układ z dwiema pompami hydraulicznymi o zmiennej wydajności i dwoma silnikami hydraulicznymi o stałej chłonności (równoległe połączenie pomp);
  - wariant III – układ z dwiema pompami hydraulicznymi o zmiennej wydajności i dwoma silnikami hydraulicznymi o stałej chłonności (połączenie pomp na wspólnym wale);
  - wariant IV – układ z dwiema pompami hydraulicznymi o zmiennej wydajności i dwoma silnikami hydraulicznymi o zmiennej chłonności oraz jedną pompą do układu skrzętu.
- W opracowywanej koncepcji hydrostatycznego układu napędowego trójosiowej platformy wysokiej mobilności o skręcie burtowym, dla 3-tonowego inżynierskiego robota wsparcia, rozpatrywano dwie konfiguracje – wariant II i III. W niniejszym referacie bliżej zaprezentowano pierwszą z nich.
- W wariantcie II różnicowanie ilości czynnika roboczego, dopływającego liniami zasilającymi do silników prawej i lewej

burty pojazdu, odbywa się poprzez przetłaczanie oleju z jednej z nich do drugiej. Realizuje się to dodatkową pompą układu skrzętu, sterowaną niezależnie od pompy głównej zasilającej – która odpowiedzialna jest jedynie za zmianę prędkości ruchu maszyny.

Osobnym zagadnieniem jest utrzymywanie prostoliniowego kierunku jazdy. Wymaga to uzyskiwania jednakowej prędkości obrotowej kół na prawej i lewej burcie. Przy zastosowaniu jednej pompy zasilającej, tłoczącej jednocześnie olej do dwóch obwodów, z uwagi na możliwość występowania w nich różnych obciążeń, konieczne jest zastosowanie dzielnika przepływu. Zapewnienie platformie wysokiej mobilności terenowej narzuca przeniesienie napędu na wszystkie koła. Biorąc pod uwagę fakt, iż pojazd ma posiadać podwozie trójosiowe, projektowany układ musi również zapewniać równomierny rozdział oleju dostarczanego do wszystkich silników hydraulicznych danej burty. Z uwagi na ograniczenie wielkości zastosowanych jednostek hydrostatycznych dopuszczono możliwość występowania dwóch zakresów prędkości poruszania się: szosowy i terenowy. Opracowane rozwiązanie układu hydraulicznego, realizującego wymienione funkcje, prezentuje rys. 5.

Szosowy zakres prędkości realizowany będzie przy szeregowym połączeniu silników hydraulicznych w każdej z burt (rys. 5 a).

Konfiguracja taka zapewnia przepływ przez nie 1/2 objętości cieczy roboczej generowanej przez główną pompę zasilającą. Natomiast tryb terenowy uzyskuje się przy połączeniu równoległym silników (rys. 5 b). Aby zapewnić w takim przypadku równomierne dostarczanie oleju do silników każdej z burt, zastosowano potrójne dzielniki przepływu. Dzięki temu, niezależnie od występujących obciążeń, przez każdy z nich przepływa 1/6 oleju dostarczanego przez pompę.

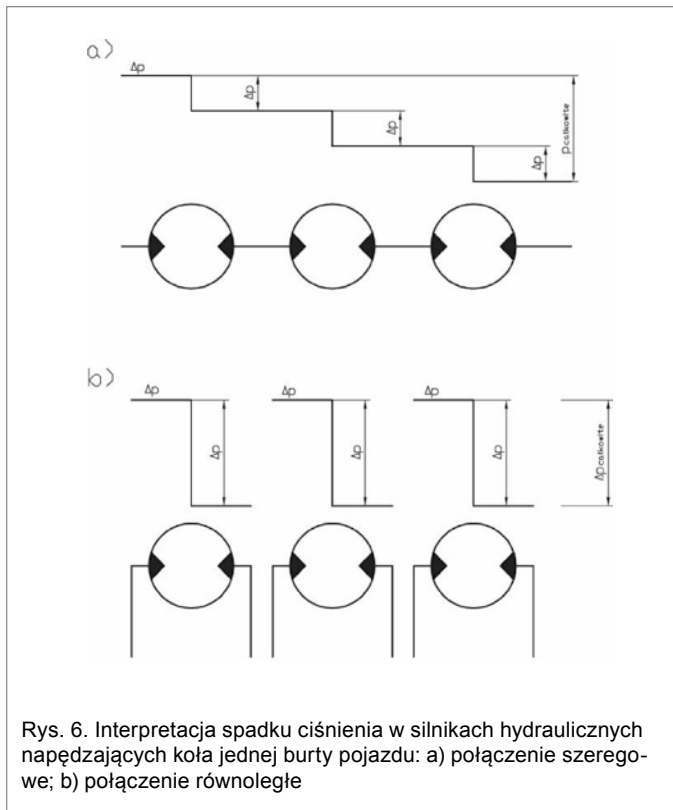
Szeregowe bądź równoległe połączenie silników hydraulicznych, oprócz zmiany rozwijanych prędkości jazdy, wpływa oczywiście na zmianę wartości siły rozwijanej na kołach napędowych. Związane to jest z maksymalnym ciśnieniem, jakie będzie mogło panować w układzie. Przewiduje się, że powinno ono przekroczyć 25 MPa. Problem ten obrazuje rys. 6. Na jego podstawie można stwierdzić, że siła rozwijana w trybie szosowym będzie około trzykrotnie mniejsza niż w terenowym.

Rozwiniętą postać schematu układu hydraulicznego dla opracowywanej bezzałogowej platformy lądowej prezentuje rys. 7. Dobór konkretnych podzespołów i elementów do projektowanego układu, związany jest z wysterowaniem rozdzielaczy. Dla rozpatrywanego układu będzie to związane z dwoma trybami jazdy i wymaga analizy strat ciśnienia.

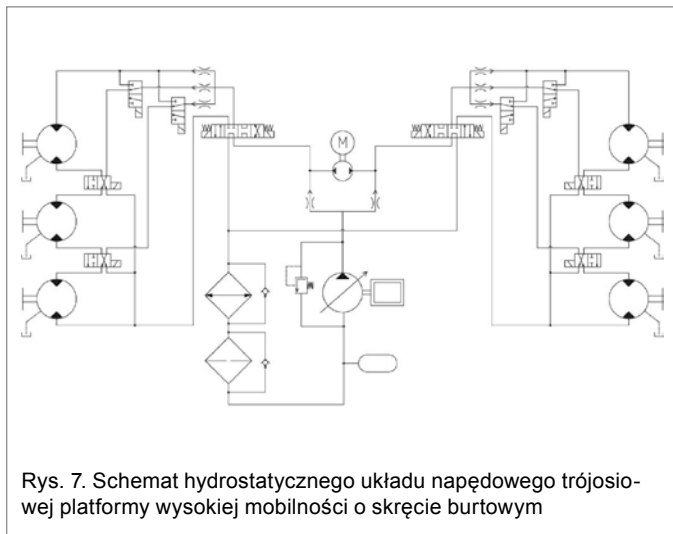
W tabeli 1 zestawiono wielkości strat ciśnienia przy zastosowaniu:

- rozdzielaczy suwakowych o nominalnym natężeniu przepływu równym maksymalnemu natężeniu przepływu w układzie (konfiguracja I);
- rozdzielaczy suwakowych o nominalnym natężeniu przepływu dwa razy większym niż maksymalne natężenie przepływu w układzie (konfiguracja II);
- rozdzielaczy zaworowych o nominalnym natężeniu przepływu dwa razy większym niż maksymalne natężenie przepływu w układzie (konfiguracja III).

Podczas projektowania układu hydraulicznego przyjęto, że maksymalny spadek ciśnienia na silnikach hydraulicznych będzie wynosił ok.  $\Delta p_{sh} = 21$  MPa. Zgodnie z literaturą, straty



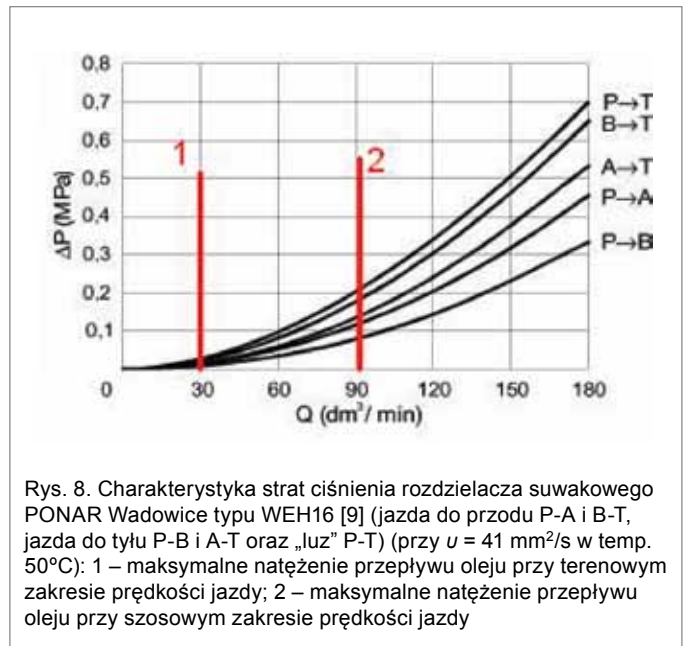
Rys. 6. Interpretacja spadku ciśnienia w silnikach hydraulicznych napędzających koła jednej burty pojazdu: a) połączenie szeregowe; b) połączenie równoległe



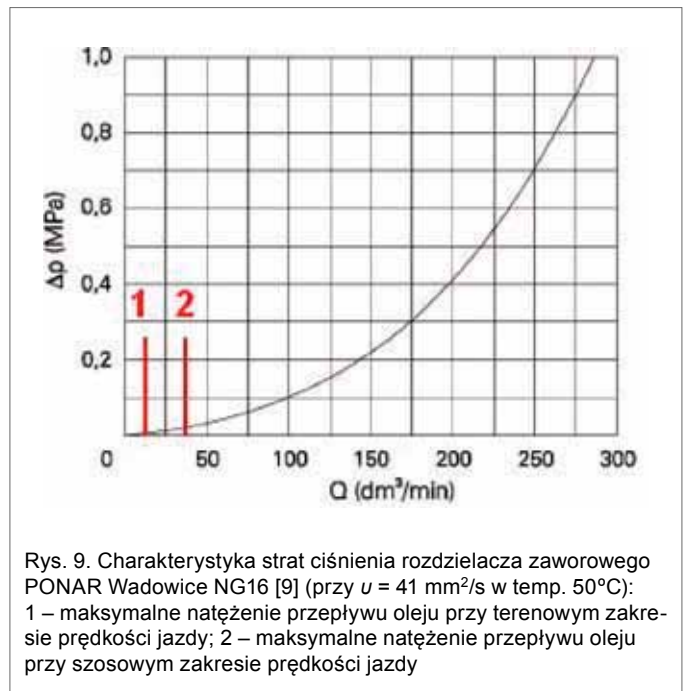
Rys. 7. Schemat hydrostatycznego układu napędowego trójosiowej platformy wysokiej mobilności o skręcie burtowym

w instalacji nie powinny przekroczyć 10% tej wartości, co daje  $\Delta p_{str} \approx 2,1$  MPa [3,5]. Spadek ciśnienia na poszczególnych elementach instalacji został określony na podstawie charakterystyk podawanych przez producentów.

Przeprowadzone analizy wykazały, że straty w trybie jazdy szosowej są większe niż w trybie terenowym. Przy doborze typowych elementów, dostosowanych do maksymalnego szacowanego natężenia przepływu, osiągnęły one wartość  $\Delta p_{str} \approx 3,1$  MPa, czyli przekroczyły o około 50% zakładany ich poziom (tab. 1 – konfiguracja I). Chcąc je zredukować, przyjęto w pierwszym etapie, że zastosowane zostaną rozdzielacze o dwukrotnie większym nominalnym natężeniu przepływu. Dzięki temu udało się obniżyć na nich straty z  $\Delta p_{str} \approx 1$  MPa do  $\Delta p_{str} \approx 0,3$  MPa (rys. 8), a całkowitą ich wartość w instalacji do  $\Delta p_{str} \approx 2,4$  MPa (tab. 1 – konfiguracja II).



Rys. 8. Charakterystyka strat ciśnienia rozdzielacza suwakowego PONAR Wadowice typu WEH16 [9] (jazda do przodu P-A i B-T, jazda do tyłu P-B i A-T oraz „luz” P-T) (przy  $u = 41$  mm<sup>2</sup>/s w temp. 50°C): 1 – maksymalne natężenie przepływu oleju przy terenowym zakresie prędkości jazdy; 2 – maksymalne natężenie przepływu oleju przy szosowym zakresie prędkości jazdy



Rys. 9. Charakterystyka strat ciśnienia rozdzielacza zaworowego PONAR Wadowice NG16 [9] (przy  $u = 41$  mm<sup>2</sup>/s w temp. 50°C): 1 – maksymalne natężenie przepływu oleju przy terenowym zakresie prędkości jazdy; 2 – maksymalne natężenie przepływu oleju przy szosowym zakresie prędkości jazdy

Ponieważ nadal przekraczały przyjęty poziom, przeprowadzono analizę dla tej samej wielkości rozdzielacza, ale w wersji zaworowej. Przy takiej ich konstrukcji uzyskano straty o wartości około  $\Delta p_{str} \approx 0,1$  MPa (rys. 9), a całkowite około –  $\Delta p_{str} \approx 2,2$  MPa (tab. 1 – konfiguracja III), co uznano za poziom akceptowalny.

W każdej z rozpatrywanych konfiguracji, w trybie terenowym, spadek ciśnienia na analizowanych elementach instalacji był niższy o około 40% (tab. 1).

Przyjęcie struktury hydrostatycznego układu napędowego wg wariantu III (rys. 4), czyli zastosowania pompy podwójnej, pozwala zrezygnować z podwójnego dzielnika przepływu i tym samym obniżyć straty sumaryczne do –  $\Delta p_{str} \approx 2,2$  MPa. W tym przypadku uzyskujemy również nieznaczny spadek (około 5%) masy całkowitej elementów instalacji hydraulicznej (tab. 2).

Tabela 1. Zestawienie wielkości strat ciśnienia  $\Delta p_{str}$  na poszczególnych elementach instalacji hydraulicznej (wg rys. 7) dla różnych typów i wielkości zastosowanych rozdzielaczy [9]

Element	Straty ciśnienia $\Delta p_{str}$ [MPa]						
	Bieg szosowy ( $Q_{sh} = 95 \text{ dm}^3/\text{min}$ )			Bieg terenowy ( $Q_{sh} = 31,7 \text{ dm}^3/\text{min}$ )			
	Konfig. I	Konfig. II	Konfig. III	Konfig. I	Konfig. II	Konfig. III	
Dzielnik przepływu podwójny	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Rozdzielacz suwakowy (2x)	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	
Dzielnik przepływu potrójny	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Rozdzielacz	zaworowy	–	–	0,2	–	–	0,02
	suwakowy	1,0	0,3	–	0,6	0,2	–
Rozdzielacz suwakowy	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,15	
Chłodnica oleju	0,15	0,15	0,15	0,03	0,03	0,03	
Filtr oleju	0,35	0,35	0,35	0,2	0,2	0,2	
Straty w przewodach	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
Suma	3,1	2,4	2,2	1,88	1,48	1,26	

Tabela 2. Zestawienie masowe podzespołów hydraulicznych układów skrętu dla dwóch wybranych wariantów ich struktur (por. rys. 4)

Element	Masa elementów składowych	
	Schemat układu – wariant II (rys. 4)	Schemat układu – wariant III (rys. 4)
Dzielnik przepływu – potrójny	45 kg	45 kg
Rozdzielacze/zawory	148–152 kg	148–152 kg
Chłodnica	6 kg	6 kg
Dzielnik przepływu – podwójny	15 kg	–
Pompa główna układu jazdy	50 kg	65 kg
Pompa skrętu	12 kg	–
Suma	231–235 kg	219–223 kg

#### 4. Podsumowanie

Przedstawione w referacie rozwiązanie hydrostatycznego układu napędowego jazdy dla bezzałogowej platformy lądowej zapewnia osiągnięcie wszystkich założonych cech funkcjonalnych. Możliwość stałego dostarczania momentu na wszystkie koła ogranicza wpływ niejednorodności podłoża na wartość rozwijanej siły napędowej. Burtowy system skrętu zapewnia jednocześnie bardzo wysoką zwrotność, co znacznie ułatwia manewrowanie pojazdem realizującym zadania w trybie teleoperacji.

Wadą hydrostatycznych układów napędowych, ograniczającą zakres ich stosowania, jest stosunkowo niska sprawność. Dlatego niezwykle ważne jest odpowiednie dobranie poszczególnych jego podzespołów, co wykazały przeprowadzone analizy rachunkowe.

#### Literatura

- [1] BARTNICKI A., SPRAWKA P.: *Zastosowanie hydrostatycznych układów napędowych we współczesnych maszynach i pojazdach lądowych*. LOGITRANS, Szczyrk 2008.

- [2] BUDNY E.: *Napęd i sterowanie układów hydraulicznych w maszynach roboczych*. ITE, Radom 2001.
- [3] GARBACIK A. i in.: *Studium projektowania układów hydraulicznych*. Ossolineum, Kraków 1997.
- [4] KUCZMARSKI F., TYPIAK A.: *Lekki zdalnie sterowany pojazd – jako nośnik wyposażenia specjalistycznego i uzbrojenia. Polska wizja przyszłego pola walki*. OBRUM, Warszawa 2004.
- [5] STRYCYEK S.: *Napęd hydrostatyczny*. Tom I. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
- [6] SZYDELSKI Z.: *Napęd i sterowanie hydrauliczne w pojazdach i samojezdnych maszynach roboczych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980.

Adam Bartnicki, Tomasz Muszyński –  
Wojskowa Akademia Techniczna  
abartnicki@wat.edu.pl, tmuszynski@wat.edu.pl